

А.З. Багерман, Ю.Н. Арсеньев, И.П. Леонова, В.А. Рахманов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ И СОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ МАТЕРИАЛОВ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН В КРЫЛОВСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ НАУЧНОМ ЦЕНТРЕ ЗА 2009–2017 ГГ.

Объект и цель научной работы. Объектом являются жаропрочные материалы, используемые в газовых турбинах, в первую очередь морского назначения. Цель исследований – получить закономерности влияния различных факторов, таких как температура и солевая нагрузка, на скорость разрушения этих материалов.

Материалы и методы. Материалами для исследований являлись результаты собственных испытаний жаропрочных сплавов на газодинамическом стенде Крыловского центра. Скорость потери массы оценивалась гравиметрическим методом.

Основные результаты. Удалось установить, что жаропрочные и титановые материалы в коррозионной среде ведут себя единообразно, солевая нагрузка влияет на скорость потери массы, а наружный слой материала воздействует на коррозионный процесс. Также выявлены особенности поведения жаропрочных сплавов при температурах выше 900 °С.

Заключение. Полученные результаты позволяют оценивать коррозионную стойкость жаропрочных материалов, необходимость использования защитных покрытий в зависимости от условий эксплуатации. Выявленные особенности процессов солевой коррозии при температурах выше 900 °С, требующие подробного исследования этого явления, ограничили диапазон рассматриваемых температур до 700–900 °С.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, жаропрочный сплав, коррозионная стойкость сплава, потеря массы сплава.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Багерман А.З., Арсеньев Ю.Н., Леонова И.П., Рахманов В.А. Результаты исследований высокотемпературного окисления и солевой коррозии материалов лопаток газовых турбин в Крыловском государственном научном центре за 2009–2017 гг. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 97–106.

УДК 621.438:620.193

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-97-106

A.Z. Bagerman, Yu.N. Arseniev, I.P. Leonova, V.A. Rakhmanov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

RESULTS OF INVESTIGATIONS INTO HIGH-TEMPERATURE OXIDATION AND SALT CORROSION OF TURBINE BLADE MATERIALS CONDUCTED BY KRYLOV STATE RESEARCH CENTRE FROM 2009 TO 2017

Object and purpose of research. Heatproof materials used primarily in marine gas turbines are studied. The purpose is to derive relationships between the rate of material deterioration and various factors such as temperature and salt load.

Materials and methods. The data obtained from tests of heatproof alloys on gas dynamic test facility of Krylov State Research Centre were used as inputs for the investigations. The rate of weight loss was assessed by the gravimetric method.

Main results. It is found that heatproof materials and titanium alloys show similar behavior in corrosive environment. The salt load influences the rate of weight loss, while the surface layer of materials influences the corrosion process. Also, specific behavior of heatproof materials at temperatures above 900 °C has been identified.

Conclusion. The results obtained in these studies make it possible to assess the corrosion resistance of heatproof materials and find out if there is a need for application of protective coating in given service conditions. The temperature range is limited



to 700–900 °C in connection with some special salt corrosion effects at temperatures over 900 °C, which have been identified during the study and call for more detailed investigations into that phenomenon.

Key words: gas turbine engine, heatproof alloy, corrosion resistance of alloy, weight loss rate.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Bagerman A.Z., Arseniev Yu.N., Leonova I.P., Rakhmanov V.A. Results of investigations into high-temperature oxidation and salt corrosion of turbine blade materials conducted by Krylov State Research Centre from 2009 to 2017. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 3(385): 97–106 (in Russian).

UDC 621.438:620.193

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-97-106

Введение

Introduction

Работы по исследованию процессов высокотемпературной коррозии жаропрочных сплавов начались в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова) в 70-е гг. XX века. Этому предшествовали исследования условий эксплуатации газотурбинных двигателей на кораблях и судах.

Были сформулированы некоторые требования к проведению коррозионных испытаний. Так появилось понятие «солевая нагрузка», определяющее количество соли, которое поступает на единицу рабочей поверхности в единицу времени, оценены количественные значения этого параметра применительно к газовым турбинам морских газотурбинных двигателей, оценены коэффициенты сепарации солей из газового потока на лопатках турбин, цилиндрах, конусах и пластинах.

Коррозионные испытания проводились на специальных стендах и на полноразмерных двигателях.

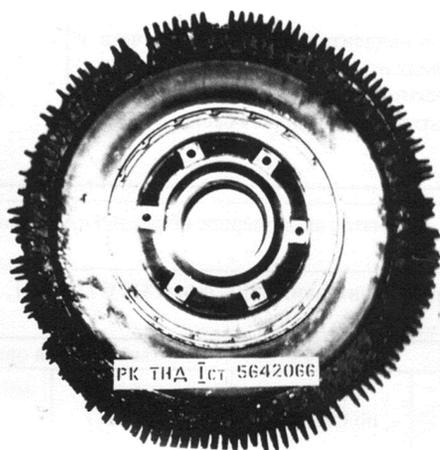


Рис. 1. Рабочее колесо I ступени турбины низкого давления

Fig. 1. Impeller of the first stage of low-pressure turbine

лях. Основные работы на полноразмерных газотурбинных двигателях (ГТД) были выполнены в филиале Крыловского государственного научного центра в районе г. Чкаловска.

Коррозия авиационных газотурбинных двигателей

Corrosion of aircraft gas turbine engines

В качестве опытных использовались авиационные двигатели АИ-20 и АИ-24 (четыре образца). Двигатели препарировались и испытывались до выхода из строя. Условия эксплуатации воспроизводились подачей «морской» воды на вход в компрессор и подмешиванием к топливу [1]. При подаче воды в компрессор четко обозначалась граница солевых отложений в проточной части компрессора по их расслоению. Отложения заканчивались в зоне, где температура воздуха достигала 120–130 °C.

Коррозионные повреждения лопаток из сплавов ЖС6К, ЖС26, не совместимые с дальнейшим использованием, появлялись приблизительно за 160 часов, причем как на поверхности лопаток, так и во внутренних полостях. Под влиянием солей, поступающих во внутренние полости лопаток с охлаждающим воздухом, материал корродировал и продукты коррозии блокировали каналы охлаждения, температура материала увеличивалась, ускоряя коррозию.

Были примеры коллективного разрушения. На одном из двигателей АИ-24 после подачи соленой воды в проточную часть произошло разрушение сразу нескольких ступеней турбинных лопаток. Результаты показаны на рис. 1 [1].

Порядок испытаний

Test procedure

Все результаты исследований, приведенные ниже, были получены на огневых стендах, созданных в XXI веке на территории собственно ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Основной целью исследований являлось изучение начального периода коррозии под влиянием солей морской воды.

В существующих работах начальные этапы принимались продолжительностью в несколько часов и даже сотен часов. Все, что происходило «внутри» этапа, называлось «инкубационным периодом», в течение которого масса образцов увеличивалась, а затем начинала уменьшаться – и наступал период «катастрофической» коррозии. Коррозионная среда – это воздух или продукты сгорания дизельного топлива или керосина при наличии на поверхности образцов отложений солей морской воды (хлористый натрий, сульфат натрия и другие соли).

Для исследования начального периода продолжительность первых этапов была принята равной 8 минутам. На это время образцы погружались в коррозионную среду при заданной температуре. Изменения, произошедшие с образцом исследуемого материала, определялись гравиметрическими методами. Образцы перед испытаниями тщательно отмывались, взвешивались. Те же операции выполнялись после пребывания в коррозионной среде. Изменения массы образцов относились к полной его поверхности, и дальнейший анализ базировался на величине относительного изменения массы (Δm , г/м²).

Увеличение массы не всегда происходило на первом этапе (по разным причинам, включая продолжительность пребывания в коррозионной среде), поэтому в описанной здесь технологии продолжительность первых этапов была ограничена 8 минутами. Полученная величина увеличения массы характеризовала скорость реакции коррозионной среды с исследуемым материалом. Как показали исследования, эта величина на протяжении как минимум 100 часов испытаний оставалась неизменной.

При обработке результатов испытаний учитывалось то, что в процессе коррозионного разрушения образцы не только теряют массу, но и приобретают массу коррозионной среды, т.е. изменение их массы складывается из прибыли в виде элементов коррозионной среды (оцененной выше) и убыли материала сплава (рис. 2). В результате получают зависимости, приведенные на рис. 3. Оказалось, что величина потери массы (измеряемая) связана с величиной увеличения массы на первых этапах испытаний. Практически все образцы из одного сплава имеют большие или меньшие различия по потере массы в одинаковых условиях. Эти различия проявляются уже на первых этапах испытаний (рис. 3) [2].

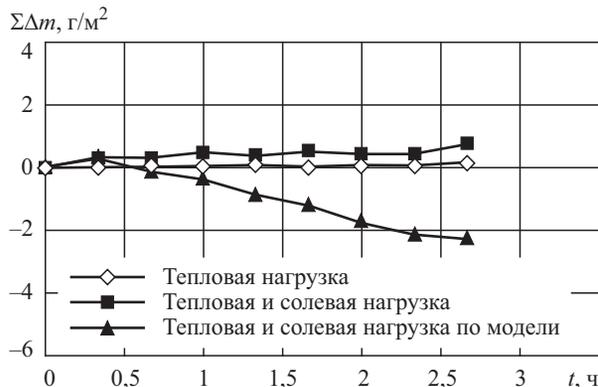


Рис. 2. Изменение массы образцов с учетом и без учета прирбыли

Fig. 2. Change in weight of specimens with and without weight gain

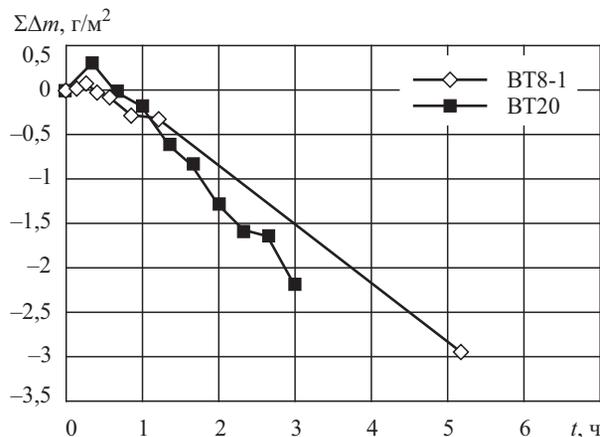


Рис. 3. Сравнение средних значений накопленного изменения массы, рассчитанных по модели для образцов сплавов BT8-1, BT20 с тепловой (500 °С) и солевой нагрузкой

Fig. 3. Comparison of average accumulated change in weight using model-based estimations for BT8-1, BT20 alloys exposed to heat (500 °C) and salt loads

Связь увеличения и потери массы в первом периоде коррозионного процесса

Weight gain and loss relationship in the first phase of corrosion process

Если после каждого этапа испытаний сравнивать величину потерянной массы (Б) и приобретенной (В), то для жаропрочных сплавов результаты получаются такими, как показано на рис. 4 [3]. Отношение потерянной массы к приобретенной стремится

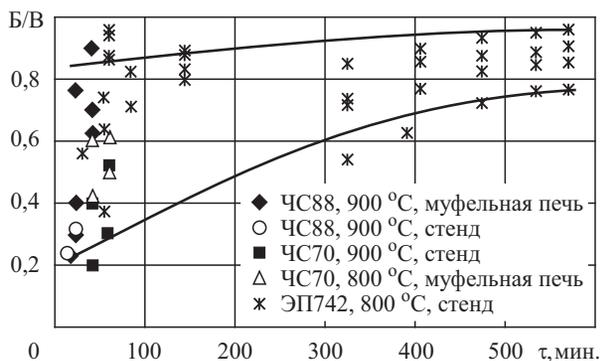


Рис. 4. Изменение отношения потерянной массы к приобретенной для жаропрочных сплавов

Fig. 4. Change in weight loss to gain ratio for heatproof alloys

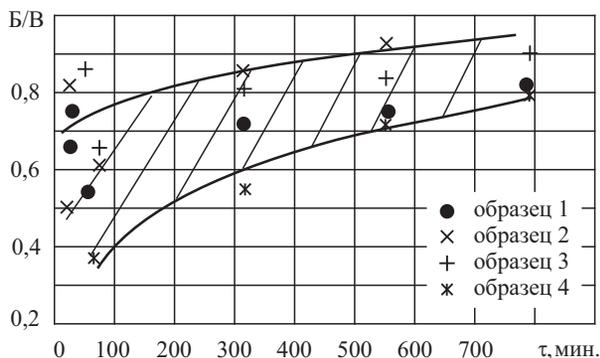


Рис. 5. Изменение отношения потерянной массы к приобретенной для сплава VT8-1 (500 °C)

Fig. 5. Change in weight loss to gain ratio for VT8-1 alloy (500 °C)

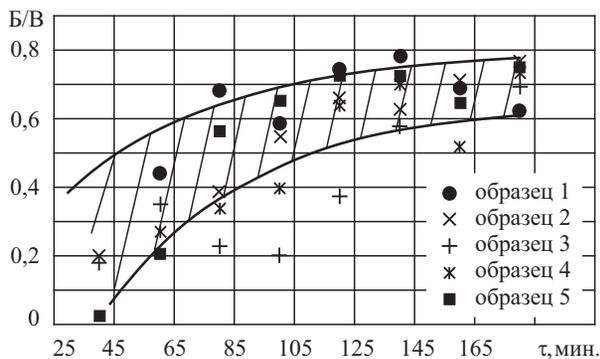


Рис. 6. Изменение отношения потерянной массы к приобретенной для сплава VT20 (500 °C)

Fig. 6. Change in weight loss to gain ratio for VT20 alloy (500 °C)

к единице. Такая же картина наблюдается для сплавов VT8-1 (рис. 5) и VT20 (рис. 6).

Соотношение «прибыли» массы образцов и «убыли» можно оценить по химическим реакциям элементов исследуемого сплава. Для часто используемых сплавов массовое соотношение серы/сплав составляет 1:3, т.е. одна единица серы выводит из строя три единицы сплава. Следовательно, при наблюдаемом взаимоотношении сплава с коррозионной средой (соотношение, близкое к единице) происходит накопление «материала» до критического состояния, когда начинается коррозия, названная «катастрофической».

В первый период коррозионного процесса, когда продукты коррозии удерживаются на поверхности образца, детали, создается впечатление, что разрушения еще нет, и идет инкубационный процесс. Однако фотографии, полученные со шлифов после 3–5 часов испытаний в коррозионной среде, показывают изменения в состоянии наружной поверхности образца (рис. 7) [10].

Причиной изменения состояния поверхности материала является увеличение объема, занимаемого окислом или сульфидом, по сравнению с объемом, занимаемым легирующим элементом в сплаве. В работе [10] приведены значения коэффициентов для каждого легирующего элемента, определяющих эти изменения объема.

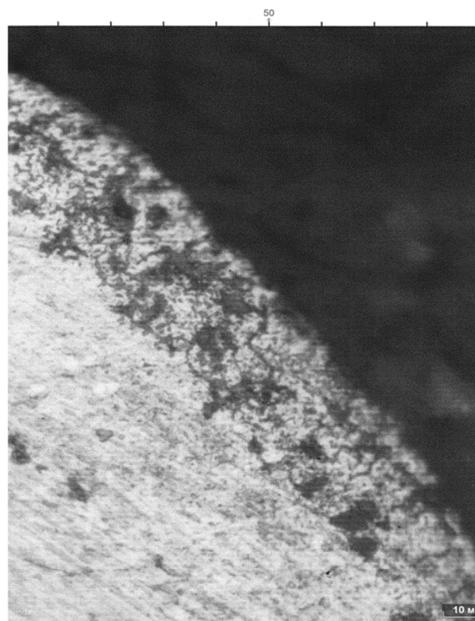


Рис. 7. Наружный слой лопатки

Fig. 7. Blade surface layer

Влияние солевой нагрузки

Salt load effect

Солевая нагрузка как равноправный участник коррозионного процесса проявляет себя через потери массы. Первые зависимости потери массы от величины солевой нагрузки при разных температурах газового потока были получены в 80-е гг. на натуральных скоростях потока на газодинамическом стенде. Каждая экспериментальная точка получена в результате 100 часовых испытаний (рис. 8) [5]. Испытания 2012 г. показали, что характер зависимости не изменился: потери массы по-прежнему зависят от солевой нагрузки. Максимальная величина и соответствующая ей солевая нагрузка для каждого сплава индивидуальны (рис. 9) [2, 3]. Такая же зависимость была получена и у титановых сплавов BT8-1 и BT20 (рис. 10).

Построим аналогичную зависимость в относительных координатах, где по оси абсцисс отложена относительная величина солевой нагрузки рассматриваемого сплава к солевой нагрузке соответствующей максимальной потере массы этого сплава, а по оси ординат – отношение ординаты (потери массы сплава) к максимальной потере этого сплава. В результате получим общую у жаропрочных сплавов зависимость потери массы от солевой нагрузки. На рис. 11 показана такая зависимость для четырех сплавов [3, 4].

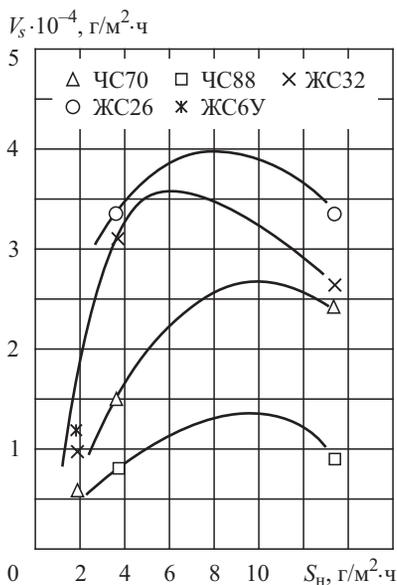


Рис. 9. Скорость присоединения серы к сплавам

Fig. 9. Rate of alloy sulfurization

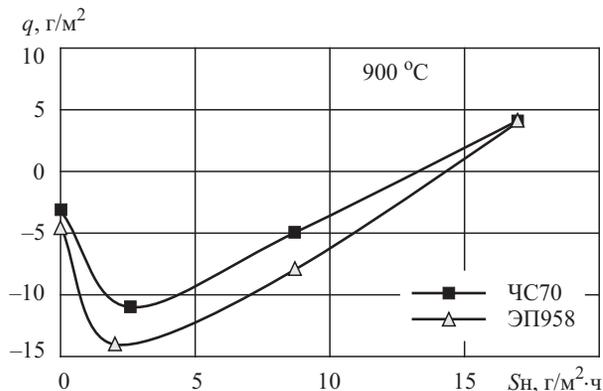


Рис. 8. Влияние солевой нагрузки на изменение массы сплавов

Fig. 8. Salt load effect on change in weight loss of alloys

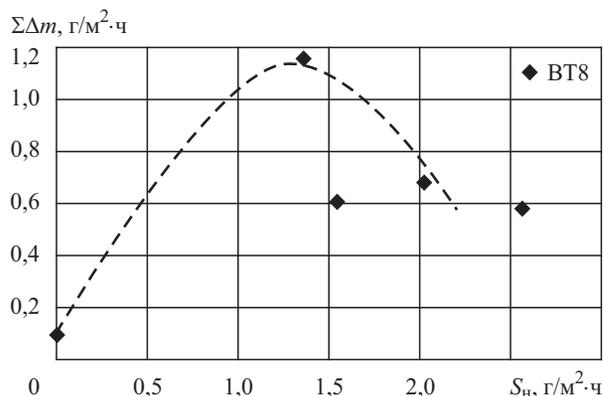


Рис. 10. Зависимость скорости изменения массы от солевой нагрузки для образцов BT8-1

Fig. 10. Rate of weight change versus salt load for BT8-1 alloy specimens

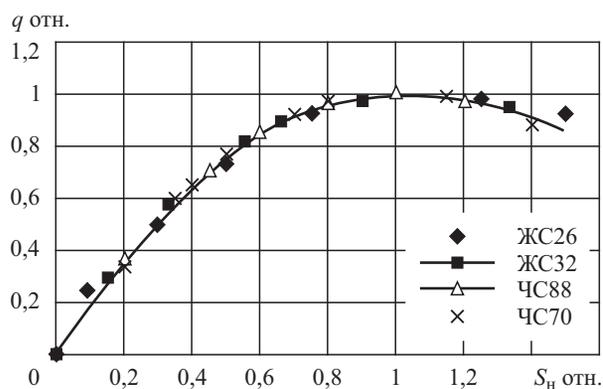


Рис. 11. Зависимость увеличения массы сплава от солевой нагрузки

Fig. 11. Rate of weight gain versus salt load

Зачистка прокорродировавших участков

Cleaning of corroded areas

В процессе эксплуатации детали могут быть повреждены коррозией на отдельных участках поверхности, поэтому появляется желание «зачистить» эти места. Эффект «зачистки» проверили на образцах из сплавов ЖС32 и ЧС70. На рис. 12 приведены результаты такого опыта. Образцы из всех представленных материалов испытывались в течение 20 часов. Затем у части образцов из сплавов

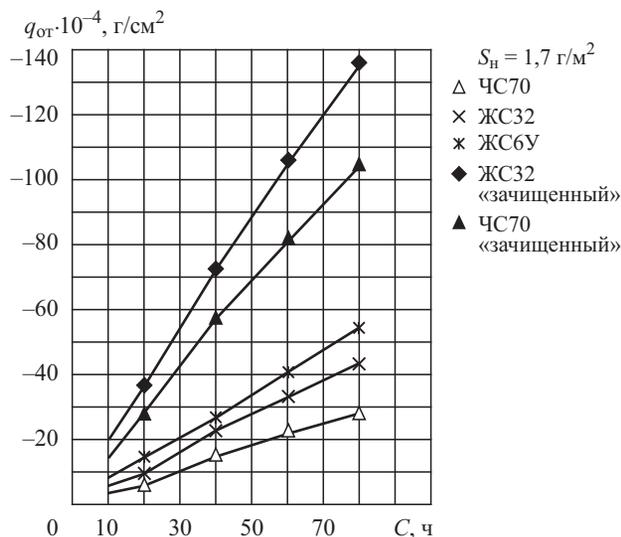


Рис. 12. Потери массы (отторжение) сплава за время испытаний

Fig. 12. Loss of weight over test time

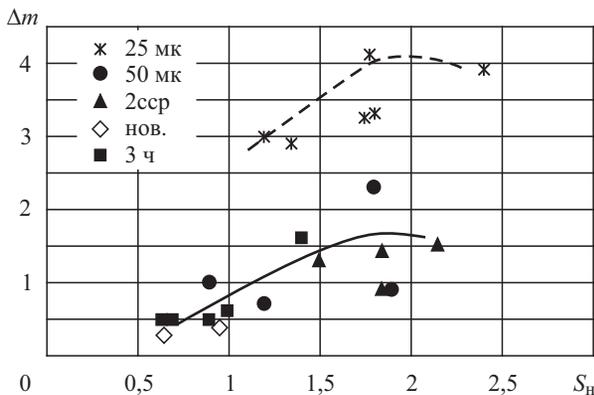


Рис. 13. Изменение массы образцов в зависимости от солевой нагрузки

Fig. 13. Change in weight of specimens under salt load

ЖС32 и ЧС70 был снят поверхностный слой величиной около 100 мкм [3].

Аналогичный опыт проведен на сплаве ВТ20 (рис. 13). В начале испытаний была получена зависимость увеличения массы (скорости реакции сплава с коррозионной средой) сплава от солевой нагрузки. Затем у этих же образцов удалили наружный слой на глубину 25 мкм. Результаты показаны на рис. 13. Потери массы возросли, т.к. увеличилась скорость присоединения элементов коррозионной среды. После того как был удален поверхностный слой глубиной 50 мкм, характеристика получила исходный вид.

«Поверхностное» влияние окисления и коррозии на прочность материалов

Surface effect of oxidation and corrosion on material strength

Согласно опытам со сплавом IN738, потеря длительной прочности материала возможна и без силовых нагрузок [6]. Другие опыты, в которых из турбинных лопаток после значительной наработки вырезали образцы и проводили испытания на длительную прочность, показали, что материал имеет практически исходные характеристики. Иными словами, за разрушение материала может отвечать только поверхностный слой.

Для проверки этого предположения выполнены следующие опыты. Были изготовлены два образца из алюминиевого сплава. Материалом для них явились две части образца с сечением 40×40 мм, полученные в результате разрушения исходного образца при испытаниях на выносливость. На рис. 14 приведены диаграммы растяжения исходного материала и образцов, полученных из «разрушенного» материала [9]. Испытания показали, что диаграммы практически совпали.

В связи с этими результатами и опытами со сплавом IN738, когда длительная прочность материала значительно уменьшилась только от высокотемпературного окисления без приложения силовых нагрузок, были оценены величины пограничного слоя нескольких жаропрочных сплавов, которые могут быть ответственны за длительную прочность. Оценка, выполненная для сплавов IN738, ЭИ827, ЭИ826, ЖС6К, ЭИ929, ЭП109, ЭП220, показала, что размеры поверхностного слоя составляют от 3 до 14 мкм [18].

Приведенные результаты подтверждают наличие связи поверхностного слоя с длительной проч-

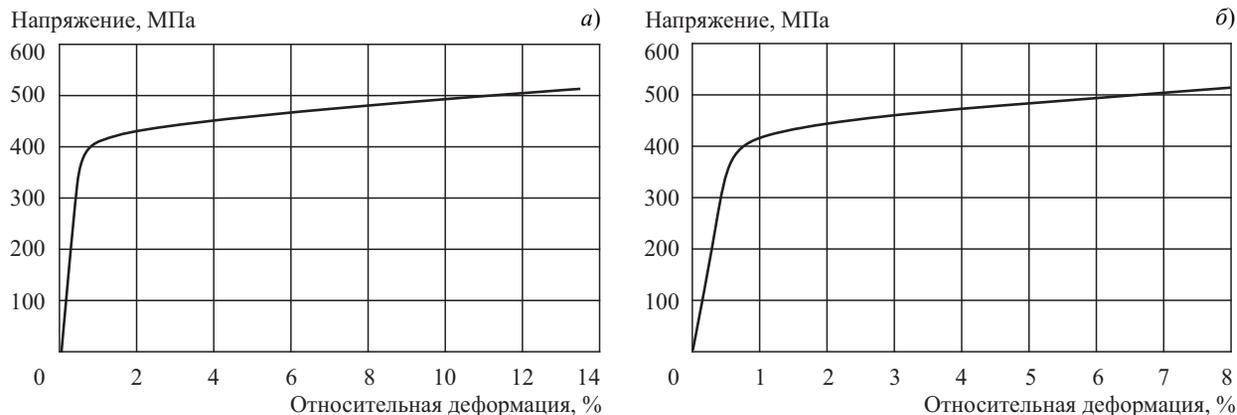


Рис. 14. Диаграмма растяжения сплава 1980 T1: а) образец № 1; б) образец № 2
Fig. 14. Tensile strain diagram for 1980 T1 alloy: а) specimen No. 1; б) specimen No. 2

ностью сплавов, а следовательно, с состоянием поверхностного слоя и потерями массы. Поэтому результаты длительных прочностных испытаний в коррозионной среде не следует представлять в виде традиционной связи: нагрузка, температура, время, – т.к. в каждый момент времени материал имеет разные потери массы и разную характеристику прочности. На рис. 15, 16 показана трансформация характеристики длительной прочности при учете потери массы [11].

Коррозия и линейное расширение материала

Corrosion and linear expansion of material

Для надежной эксплуатации материалов в условиях высокотемпературного окисления и солевой коррозии необходимо знать, как изменяются или не изменяются такие физические характеристики сплавов, как тепловое расширение и коэффициент теплопроводности. В данном направлении были рассмотрены связи коэффициентов линейного расширения и теплопроводности отдельных элементов сплава с этими характеристиками сплава. Полученные зависимости позволяют оценивать указанные характеристики для вновь создаваемых сплавов [13, 14].

Коэффициент линейного расширения сплава α_c может быть оценен с помощью зависимости

$$\alpha_c = \sum \alpha_i \cdot g_i,$$

где α_i – коэффициент линейного расширения; g_i – весовая доля элемента в сплаве соответственно; i – число элементов в сплаве.

Требования к чистоте рабочего воздуха

Working air purity requirement

С точки зрения горячей солевой коррозии соледоержание газа может быть безопасным, если при этом на поверхности деталей газовых турбин не образуются солевые отложения, которые в итоге приводят к кор-

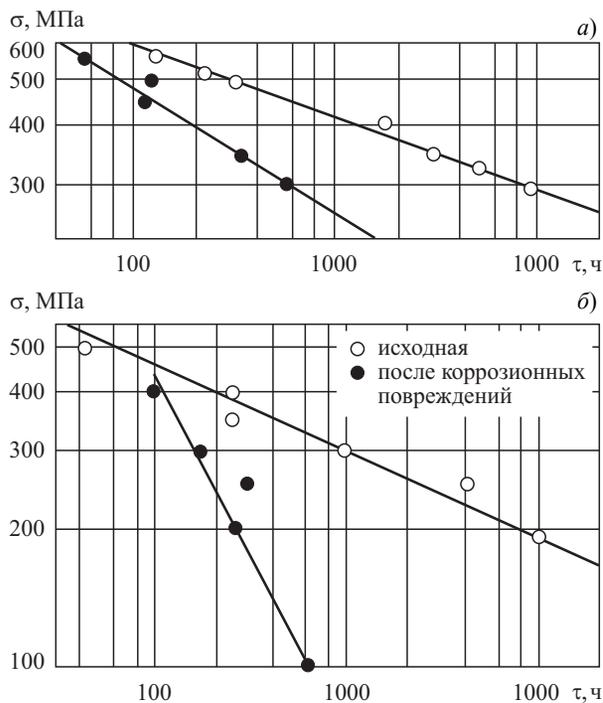


Рис. 15. Характеристика длительной прочности сплава ЖС6К: а) $t = 800$ °С, б) $t = 850$ °С
Fig. 15. Durability of ZhS6K alloy а) $t = 800$ °С, б) $t = 850$ °С

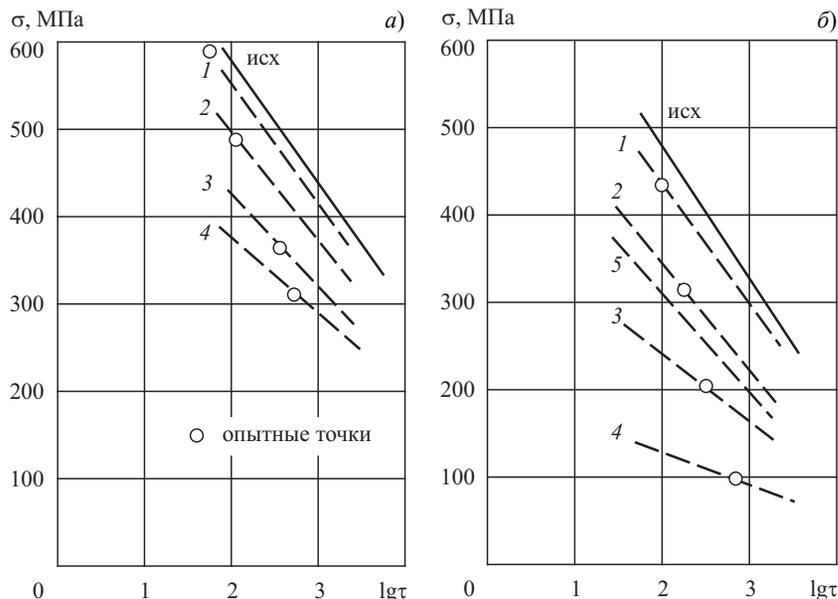


Рис. 16. Характеристика длительной прочности сплава ЖС6К при разной степени коррозионных повреждений: а) температура – 800 °С, 1 – 11 мг/см², 2 – 15 мг/см², 3 – 27 мг/см², 4 – 36 мг/см²; б) температура – 850 °С, 1 – 20 мг/см², 2 – 26 мг/см², 3 – 32 мг/см², 4 – 49 мг/см², 5 – 27 мг/см².
Fig. 16. Durability of ЖС6К alloy at different degrees of corrosion damage: а) temperature – 800 °С, 1 – 11 mg/cm², 2 – 15 mg/cm², 3 – 27 mg/cm², 4 – 36 mg/cm²; б) temperature – 850 °С, 1 – 20 mg/cm², 2 – 26 mg/cm², 3 – 32 mg/cm², 4 – 49 mg/cm², 5 – 27 mg/cm².
 o – test points

розионным повреждениям. В качестве условий, которые препятствуют образованию солевых отложений на лопатках, рассматриваются равенство количества солей, сепарирующихся на поверхности лопаток, и количества солей, испаряющихся с поверхности в единицу времени [15]. Скорость испарения солей с ростом температуры увеличивается. Например, при 900 °С она в 5 раз больше, чем при 700 °С [7]. При равенстве скоростей поступления солей на лопатки и скоростей их испарения вероятность образования солевых отложений будет минимальна.

Опытные данные показали наличие максимума сепарации при температуре около 850 °С. В диапазоне 700–1000 °С коэффициент сепарации составил 7–23 %. Результаты оценки влияния всех факторов показали, что величина «безопасного» содержания воздуха на входе в двигатель должна составлять около 0,02 мг солей на кг воздуха.

Испытания образцов с покрытиями

Tests of coated specimens

Испытания образцов с двухслойным покрытием (включая керамическое) показали, что целесообразно проводить отдельные испытания основного металла, металла с подложкой и всего комплекса. При таком подходе появляется возможность оценить «персональный» вклад всех составляющих в защиту основного металла. Например, оказалось, что возможны сочетания, когда скорость потери массы от окисления больше, чем от коррозии,

и появление солей на поверхности образца может снижать скорость потери массы. Наличие керамического покрытия снижает скорость и окисления и коррозии с учетом пористости. При этом продукты коррозии подслоя могут вымываться из пространства под покрытием [16].

Особенности коррозии при температурах выше 900 °С

Special corrosion effects at temperatures over 900 °С

Исследование коррозионных характеристик сплавов ЧС88-ВИ [19] и СЛЖС5-ВИ [20] выявило особенности этих характеристик. Так, для сплава СЛЖС5 в испытаниях на воздухе и в коррозионной среде, а для сплава ЧС88 в испытаниях на воздухе потери массы при температуре 900 и 950 °С оказались меньше, чем при температуре 800 °С. Дальнейшее увеличение температуры (более 900 °С) привело к незначительному снижению потери массы. Для сплава СЛЖС5-ВИ потери массы снизились в два раза. Такая ситуация, насколько известно авторам исследования, ранее не встречалась.

Заключение

Conclusion

1. Основное внимание в последних работах было посвящено исследованию начального периода горячей солевой коррозии и его связи с дальнейшим процессом.

- Начальный период (увеличение массы) оказался определяющим в скорости потери массы при дальнейшем процессе горячей солевой коррозии.
- Скорость взаимодействия сплавов с агрессивной средой зависит от солевой нагрузки при неизменной температуре материала и имеет максимум.
- В относительных величинах зависимости увеличения массы от солевой нагрузки для разных сплавов совпали.
- При получении коррозионных характеристик сплавов целесообразно в начальный период назначать этапы по 8–20 минут.
- В период коррозионного разрушения до 100 часов и более происходит отторжение только части поврежденного материала с элементами агрессивной среды в количестве, близком к количеству присоединенной массы элементов агрессивной среды. Количество поврежденной массы на образце увеличивается, создавая представление, что разрушения не происходит, а идет «инкубационный период».
- Багерман А.З.* 100-часовые испытания сплавов ЧС70 ВК и ЭП958 ВД в условиях солевой коррозии // Защита металлов. 1998. Т. 34. № 5. С. 518–520. [*Bagerman A.Z.* 100-hour tests of ЧС70 ВК and ЭП958 ВД alloys under exposure to salt corrosion. Metal protection. 1998. Vol. 34. No. 5. P. 518–520. (in Russian)].
- Коломыцев П.Т.* Газовая коррозия и прочность сплавов. М.: Металлургия, 1984. [*Kolomytsev P.T.* Gas corrosion and alloy durability. M.: Metallurgy, 1984. (in Russian)].
- Оршич И.В.* Разработка методики испытаний жаропрочных сплавов в расплавах солей // Защита металлов. 1981. Т. VIII. № 1. С. 3–5. [*Oryshich I.V.* Development of test methods for heatproof alloys in molten salts. 1981. Vol. VIII. No. 1. P. 3–5. (in Russian)].
- Петренчук О.П.* Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1979. [*Petrenchuk O.P.* Experimental studies of an atmospheric aerosol. L.: Gidrometeoizdat, 1979. (in Russian)].
- Багерман А.З., Кноринг С.Д.* Экспериментальная оценка «остаточных» механических характеристик разрушенного образца // Тяжелое машиностроение. 2010. № 1. С. 22–23. [*Bagerman A.Z., Knoring S.D.* Experimental evaluation of residual mechanical characteristics of a damaged specimen // Heavy industries. 2010. No. 1. P. 22–23.

Библиографический список

References

- Багерман А.З., Леонова И.П., Шитков В.Н.* Исследование возможности эксплуатации авиационных ГТД в морских условиях // Тяжелое машиностроение. 2006. № 7. С. 20–22. [*Bagerman A.Z., Leonova I.P., Shitikov V.N.* Feasibility study on marine application of aircraft gas-turbine engines // Heavy industries. 2006. No. 1. P. 20–22. (in Russian)].
- Багерман А.З., Леонова И.П., Молчанов А.С.* и др. Особенности коррозионных повреждений жаропрочных сплавов // Газотурбинные технологии. 2012. № 1. С. 18–20. [*Bagerman A.Z., Leonova I.P., Molchanov A.S.* et al. Specifics of corrosion damage to heatproof alloys // Gas turbine technologies. 2012. No. 1. P. 18–20. (in Russian)].
- Багерман А.З., Леонова И.П., Хорошев В.Г.* Экспресс оценка коррозионной стойкости жаропрочных сплавов // Газотурбинные технологии. 2012. № 4. С. 42–43. [*Bagerman A.Z., Leonova I.P., Khoroшев V.G.* Express evaluation of corrosion resistance for heatproof alloys // Gas turbine technologies. 2012. No. 4. P. 42–43. (in Russian)].
- Багерман А.З.* Коррозионные испытания жаропрочных материалов лопаток газовых турбин // Тяжелое машиностроение. 2009. № 2. С. 9–11. [*Bagerman A.Z.* Corrosion tests of high temperature resistant gas turbine blades // Heavy Engineering. 2009. No. 2. P. 9–11. (in Russian)].
- Багерман А.З., Леонова И.П., Хорошев В.Г.* Особенности представления результатов коррозионных испытаний жаропрочных сплавов для газовых турбин // Газотурбинные технологии. 2012. № 2. С. 22–23. [*Bagerman A.Z., Leonova I.P., Khoroшев V.G.* Specific aspects of representing the results of corrosion resistance tests of heatproof alloys for gas turbines // Gas turbine technologies. 2012. No. 2. P. 22–23. (in Russian)].
- Багерман А.З.* Особенности представления результатов коррозионно-прочностных испытаний жаропрочных сплавов // Газотурбинные технологии. 2013. № 6. С. 26–27. [*Bagerman A.Z.* Specific aspects of representing the results of corrosion and strength resistance tests of heatproof alloys // Gas turbine technologies. 2013. No. 6. P. 26–27. (in Russian)].
- Багерман А.З., Конопатова А.В., Леонова И.П.* Некоторые закономерности солевой коррозии сплавов // Газотурбинные технологии. 2017. № 1. С. 30–33. [*Bagerman A.Z., Konopatova A.V., Leonova I.P.* Some relationships of metal alloy salt corrosion // Gas turbine technologies. 2017. No. 1. P. 30–33. (in Russian)].
- Багерман А.З., Конопатова А.В., Леонова И.П.* и др. Особенности начального этапа развития процесса горячей солевой коррозии металлов // Газотур-

- бинные технологии. 2017 г. № 3. С. 17–19. [Bagerman A.Z., Konopatova A.V., Leonova I.P. et al. Specifics of the initial phase of hot-salt metal corrosion process // Gas turbine technologies. 2017. No. 3. P. 17–19. (in Russian)].
14. Багерман А.З. Особенности изменения характеристик жаропрочных сплавов газовых турбин в эксплуатации // Газотурбинные технологии. 2015. № 1. С. 42–43. [Bagerman A.Z. Specific in-service variations of characteristics of heatproof alloys in gas turbines // Gas turbine technologies. 2015. No. 1. P. 42–43. (in Russian)].
15. Багерман А.З., Конопатова А.В., Хорошев В.Г. Нормирование содержания воздуха, поступающего в газотурбинный двигатель // Газотурбинные технологии. 2014. № 2. С. 32–33. [Bagerman A.Z., Konopatova A.V., Khoroshev V.G. Regulation of salt content in air supplied to gas turbine engines // Gas turbine technologies. 2014. No. 2. P. 32–33. (in Russian)].
16. Багерман А.З., Киришин А.Ю., Конопатова А.В. и др. Особенности коррозионных испытаний материалов с защитными покрытиями // Тяжелое машиностроение. 2017. № 9. С. 15–17. [Bagerman A.Z., Kirshin A.Yu., Konopatova A.V. et al. Specific aspects of corrosion resistance tests for materials with protective coatings // Heavy Industries. 2017. No. 9. P. 15–17. (in Russian)].
17. Багерман А.З., Киришин А.Ю., Конопатова А.В. и др. Горячая солевая коррозия металла: самое начало // Тяжелое машиностроение. 2017. № 3. С. 22–24. [Bagerman A.Z., Kirshin A.Yu., Konopatova A.V. et al. Hot salt corrosion of metals: getting started. Heavy Industries. 2017. No. 3. P. 22–24. (in Russian)].
18. Багерман А.З. Оценка размеров поверхностного слоя жаропрочных никелевых сплавов // Тяжелое машиностроение. 2010. № 3–4. С. 32–34. [Bagerman A.Z. Estimation of surface layer thickness for heatproof nickel alloys. Heavy Industries. 2010. No. 3–4. P. 32–34. (in Russian)].
19. Багерман А.З., Конопатова А.В., Леонова И.П. и др. О своеобразии коррозионных характеристик жаропрочного сплава ЧС88-ВИ // Газотурбинные технологии. 2017. № 7. С. 34–35. [Bagerman A.Z., Konopatova A.V., Leonova I.P. et al. On special corrosive characteristics of the ЧС88-ВИ heatproof alloy // Gas turbine technologies. 2017. No. 7. P. 34–35. (in Russian)].
20. Багерман А.З., Данилов Д.В., Конопатова А.В. и др. Особенности коррозионных характеристик суперсплава СЛЖС5 // Труды ФГУП «Крыловский государственный научный центр». 2017. Вып. 4(382). С. 113–117. [Bagerman A.Z., Danilov D.V., Konopatova A.V. et al. Special corrosion characteristics of the СЛЖС5 superalloy // Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 4(382). P. 113–117. (in Russian)].

Сведения об авторах

Багерман Анатолий Захарович, ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: bagerman.a.z.@mail.ru.

Арсеньев Юрий Николаевич, начальник отдела ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-49-57. E-mail: 4_Otd@ksrc.ru.

Леонова Ирина Павловна, старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: leonirpal@mail.ru.

Рахманов Владимир Александрович, инженер 2 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: vladimir.rosbk@yandex.ru.

About the author

Anatoly Z. Bagerman, Leading Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: bagerman.a.z.@mail.ru.

Yuri N. Arseniev, Head of Department, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-49-57. E-mail: 4_Otd@ksrc.ru.

Irina P. Leonova, Senior Research Scientist, Krylov State Research. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia, Tel.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: leonirpal@mail.ru.

Vladimir A. Rakhmanov, Engineer 2nd category, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia, Tel.: 8 (812) 415-47-22. E-mail: vladimir.rosbk@yandex.ru.

Поступила / Received: 01.02.18
Принята в печать / Accepted: 07.08.18
© Коллектив авторов, 2018